

**STUDI PENGURANGAN ARUS *INRUSH TRANSFORMATOR*  
DENGAN METODE *SEQUENTIAL PHASE ENERGIZATION*  
TANPA BEBAN MENGGUNAKAN *SOFTWARE ATP-EMTP***

**SKRIPSI**

untuk memenuhi salah satu persyaratan  
mencapai derajat Sarjana S1



**Disusun oleh:**

**Unggul Aribowo**

**12524024**

**Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Islam Indonesia  
Yogyakarta  
2019**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**STUDI PENGURANGAN ARUS *INRUSH* TRANSFORMATOR DENGAN  
METODE *SEQUENTIAL PHASE ENERGIZATION* TANPA BEBAN MENGGUNAKAN  
SOFTWARE *ATP-EMTP***

**TUGAS AKHIR**  
**ISLAM**  
UNIVERSITAS INDONESIA  
Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik  
pada Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Islam Indonesia

Disusun oleh:

Unggul Aribowo  
12524024

الجمهورية الإسلامية  
Yogyakarta, 09 Januari 2019  
الجمهورية الإسلامية

Menyetujui,

Pembimbing



Wahyudi Budi Pramono, ST., M.Eng  
98524104

**LEMBAR PENGESAHAN**

**SKRIPSI**

**STUDI PENGURANGAN ARUS *INRUSH TRANSFORMATOR* DENGAN METODE  
*SEQUENTIAL PHASE ENERGIZATION* TANPA BEBAN MENGGUNAKAN  
*SOFTWARE ATP-EMTP***

Dipersiapkan dan disusun oleh:

**Unggul Aribowo**

**12524024**

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: 24 Januari 2019

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : Wahyudi Budi Pramono, S.T., M.Eng. ....

Anggota Penguji 1 : Firmansyah Nur Budiman, S.T., M.Sc. ....

Anggota Penguji 2 : Setyawan Wahyu Pratomo, S.T., M.T. ....

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh gelar Sarjana

Tanggal: 24 Januari 2019



Ketua Program Studi Teknik Elektro

**Yusuf Aziz Amrulloh, S.T., M.Eng., Ph.D**

**045240101**

## PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut diatas.

Yogyakarta, 09 Januari 2019

  
METERAI  
TEMPEL  
48C DAFP 56316134  
6000  
Rupiah  
Unggul Aribowo

## KATA PENGANTAR



Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah atas kehadiran ALLAH SWT yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Tak lupa Shalawat serta salam semoga tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Agung Muhammad SAW yang telah mengantarkan umat manusia dari peradaban hidup yang jahiliyah menuju pada peradaban hidup yang modern, yang penuh dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi seperti yang kita rasakan pada saat ini. Semoga kita semua termasuk hambanya yang taat, yang berhak mendapatkan syafaatnya di hari akhir kelak. Aamiin.

Pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih yang telah membantu bimbingan dan semangat dalam pengerjaan skripsi ini. Terima kasih saya ucapkan kepada:

1. Allah SWT yang telah memberi hidayah, kesehatan dan ridho-Nya sehingga pengerjaan skripsi ini bisa selesai.
2. Kedua orang tua yang memberi kepercayaan, semangat dan dukungan moril sehingga skripsi ini terselesaikan.
3. Bapak Wahyudi Budi Pramono, S.T., M.Eng., selaku pembimbing yang dengan sabar mau menjadi pembimbing saya sampai selesai.
4. Teman – teman Teknik industri adit, andika, hanif, yonas, Irfan serta teman angkatan Teknik elektro 2012 martin, andika, viki, dan bobul dan tak lupa teman perjuangan tomblok, jabrik, yang telah banyak mensupport.
5. Dan masih banyak lagi pihak yang tidak bisa penulis sebutkan.

Penulis sangat sadar apabila skripsi ini masih jauh dari sempurna. Semoga laporan ini bermanfaat bagi pembaca dan Allah senantiasa memberi ilmu bagi kita semua. Amiin

Wassalamualaikum Wr.Wb

Yogyakarta, 9 Januari 2019

Penulis

## ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

ATP-EMTP	<i>Alternative Transient Program-Elektromagnetic Transient Program.</i>
<i>SPE</i>	<i>Sequential Phase Energization.</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
GGL	Gaya Gerak Listrik
V	Tegangan
L	Induktansi
$B_R$	Kerapatan Fluks Sisa Dari Inti <i>Transformator</i>
$B_S$	Kerapatan Fluks Saturasi Dari Inti
$B_N$	Nilai Arus Nominal
kV	Kilo Volt
kVa	Kilo Volt Ampere
$\varphi$	Phi
$\phi$	Fluks
Hz	<i>Hertz</i>
MVA	Mega Volt Ampere
A	<i>Ampere</i>
kW	Kilo Watt
I	Arus
R	Tahanan
P <sub>cu</sub>	Rugi – rugi tembaga
P <sub>i</sub>	Rugi – rugi besi
Ph	Rugi – rugi histerisis
Pe	Rugi – rugi eddy

## ABSTRAK

Transformator berkerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Ketika *transformator dienergize* dan ketika dimatikan maka akan menghasilkan fluks sisa pada inti *transformator* atau yang biasa disebut *residual fluks*. Besar kecilnya arus *inrush* bergantung pada fluks *residual* dalam *transformator*. Arus *inrush* ini bernilai bisa berkali-kali lipat dari arus nominal *transformator* sehingga arus *inrush* pada *transformator* harus sebisa mungkin dikurangi. Banyak cara dalam pengurangan arus *inrush* salah satunya dengan menggunakan pengontrolan *switch* pada saat *energize*. Apabila arus ini berlangsung terus menerus akan berdampak pada usia transformator serta mengganggu kerja rele proteksi. Maka itu perlu adanya upaya pengurangan arus *inrush*. Ada beberapa cara dalam pengurangan arus *inrush* salah satunya menggunakan metode *sequential phase energization (SPE)*. Metode ini dinilai sangat sederhana dan efektif dalam pengurangan arus *inrush*, secara garis besarnya metode *SPE* ini bekerja dengan cara memperhatikan *delay* waktu antar *switch* setiap fasanya agar mendapatkan hasil yang optimal. Maka dari itu Tugas akhir ini akan berfokus pada pengurangan arus *inrush*. Pada tahap pertama mensimulasikan pengurangan arus *inrush* menggunakan metode *SPE* dan membandingkan hasil sebelum menggunakan metode *SPE* dan sesudah menggunakan metode *SPE*. Dalam simulasi ini menggunakan metode *SPE* berhasil mengurangi lonjakan arus *inrush* pada fasa 1 sebesar 33,25 %, fasa 2 sebesar 61,59 % dan fasa 3 sebesar 57,24 %. Dari hasil simulasi ini pengurangan arus *inrush* menggunakan metode *SPE* layak diaplikasikan.

**Kata kunci:** *transformator, arus inrush, sequential phase energization (SPE)*.

# DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	x
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Manfaat Penelitian .....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	3
2.1 Studi Literatur .....	3
2.2 Tinjauan Teori.....	3
2.2.1 Transformator .....	3
2.2.2 Arus <i>Inrush</i> .....	5
2.2.3 Hukum Faraday.....	6
2.2.4 Pemodelan <i>Transformator</i> dan Induktor di ATP-EMTP.....	8
2.2.5 Metode <i>Sequential Phase Energization (SPE)</i> .....	9
BAB 3 METODOLOGI.....	10
3.1 Data spesifikasi <i>transformator</i> .....	10



3.1.1 Data hasil pengujian <i>transformator</i> dari PT. Powel .....	10
3.1.2 Data tes hubung buka <i>transformator</i> 60 MVA.....	11
3.1.3 Data perubahan fluks terhadap arus.....	11
3.2 Alur Penelitian .....	11
3.3 Simulasi Sistem.....	13
3.4 Pemilihan Waktu <i>Close Switch</i> .....	13
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>15</b>
4.1 Hasil Simulasi Tanpa Metode <i>SPE</i> .....	15
4.2 Hasil Simulasi Dengan Metode <i>SPE</i> .....	17
4.3 Perbandingan Arus <i>Inrush</i> Tanpa Metode <i>SPE</i> dan Menggunakan Metode <i>SPE</i> .....	19
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>20</b>
5.1 Kesimpulan .....	20
5.2 Saran .....	20
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>21</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>22</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pemodelan <i>transformator</i> inti <i>core type</i> .....	4
Gambar 2.2 Pemodelan <i>transformator</i> inti <i>shell type</i> .....	4
Gambar 2.3 Proses terjadinya arus <i>inrush</i> .....	6
Gambar 2.4 <i>fluks</i> pada <i>transformator</i> saat kondisi <i>transient</i> .....	8
Gambar 2.5 Skema Metode <i>Sequential Phase Energization (SPE)</i> .....	9
Gambar 3.1 Perubahan fluks terhadap arus.....	11
Gambar 3.2 Diagram Alur Penelitian.....	12
Gambar 3.3 Pemodelan Simulasi .....	13
Gambar 4.1 Arus <i>inrush</i> pada fasa 1 tanpa metode <i>SPE</i> .....	15
Gambar 4.2 Arus <i>inrush</i> pada fasa 2 tanpa metode <i>SPE</i> .....	15
Gambar 4.3 Arus <i>inrush</i> pada fasa 3 tanpa metode <i>SPE</i> .....	16
Gambar 4.4 Arus <i>inrush</i> pada ketiga fasa tanpa metode <i>SPE</i> .....	16
Gambar 4.5 Arus <i>Inrush</i> pada fasa 1 menggunakan metode <i>SPE</i> .....	17
Gambar 4.6 Arus <i>Inrush</i> pada fasa 2 menggunakan metode <i>SPE</i> .....	17
Gambar 4.7 Arus <i>Inrush</i> pada fasa 3 menggunakan metode <i>SPE</i> .....	18
Gambar 4.8 Arus <i>Inrush</i> pada ke tiga fasa menggunakan metode <i>SPE</i> .....	19

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi <i>transformator</i> 3 phasa.....	10
Tabel 3.2 Data hasil pengujian <i>transformator</i> .....	10
Tabel 3.3 merupakan data hasil tes hubung buka <i>transformator</i> 60 MVA.....	11
Tabel 3.4 Pemilihan waktu <i>close switch</i> .....	14
Tabel 4.1 Perbandingan arus <i>inrush</i> menggunakan metode <i>SPE</i> dan tanpa metode <i>SPE</i> .....	20

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Arus *inrush* timbul saat *transformator* mau dioperasikan. Arus *inrush* mempunyai lonjakan yang tinggi dan tiba-tiba. Sehingga apabila tidak ada tindakan untuk mengurangnya akan berdampak serius pada *transformator* dan sistem tenaga listrik. Maka dari itu pengurangan arus *inrush* ini sangat diperlukan agar *transformator* dan sistem tenaga listrik berumur panjang. Ada banyak cara dalam pengurangan arus *inrush* ini tetapi beberapa metode yang digunakan untuk mengurangi arus *inrush* tidak benar-benar menghilangkan tetapi hanya mengurangi arus ketingkat yang lebih aman untuk peralatan. Yang dimana diantaranya menggunakan metode *sequential phase energization (SPE)*.

*Transformator* merupakan komponen elektronika yang digunakan untuk menurunkan atau menaikkan tegangan listrik dan kinerjanya menggunakan prinsip induksi *elektromagnetik*. Ketika *transformator* dienergize arus bolak balik (AC) maka akan menimbulkan arus yang berubah-ubah sehingga fluks magnetik akan mengalir melalui inti besi dan melewati kumparan sekunder. Akibat dari induksi magnetik yang berubah-ubah maka akan menimbulkan fluks magnetik yang berubah-ubah juga. Dari fluks magnetik yang berubah-ubah ini akan menimbulkan gaya gerak listrik (*ggl*) induksi. Jika arus yang mengalir melalui kumparan primer besar maka medan magnet yang dihasilkan juga akan semakin besar yang dialirkan ke kumparan sekunder. Pada kumparan sekunder terjadi perubahan gaya gerak listrik yang akan berpengaruh pada nilai tegangan dan arus yang tergantung pada jumlah lilitan antara kumparan primer dan sekunder.

Arus *inrush* akan diperlihatkan ketika *transformator* dienergization dengan keadaan berbeban ataupun dalam keadaan tidak ada beban sama sekali sehingga akan mengakibatkan terjadinya lonjakan arus yang sangat besar antara 8 – 12 kali nilai arus nominal tergantung pada fluks sisa *transformator* dan impedansi pada rangkian[3]. Karena itu arus ini dikurangi seminimal mungkin agar tidak menimbulkan dampak yang *negative* bagi *transformator*. Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *sequensial phase energization* secara sederhananya metode ini memberi *delay* pada masing-masing fasa (1, 2, 3) *transformator* karena arus *inrush* setiap fasanya berbeda. Untuk mengetahui arus *inrush* setiap fasa dilakukan simulasi menggunakan *software ATP-EMTP*. Pada penelitian ini untuk memodelkan *transformator* digunakan data-data *transformator* dari PT. Powel.

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang pemodelan simulasi *sequential phase energization* pada *software ATP-EMTP* ?
2. Berapa besar arus *inrush* yang timbul saat pemodelan simulasi menggunakan metode *sequential phase energization* ?
3. Apakah metode *sequential phase energization* mampu mengurangi lonjakan arus *inrush* pada *transformator* ?

## 1.3 Batasan Masalah

1. Metode yang digunakan yaitu metode *SPE*.
2. *Software* yang digunakan pada penelitian ini yaitu *ATP-EMTP*.
3. Jenis dan *setting* pengaman yang digunakan tidak ditentukan.
4. Struktur jaringan tidak dibahas secara detail.
5. Simulasi hanya fokus pada arus puncak *inrush* dan pengurangannya.
6. Simulasi tidak menggunakan beban.
7. Tidak memperhitungkan fluks sisa
8. Data *transformator* yang digunakan dari *PT. Powel*

## 1.4 Tujuan Penelitian

1. Pemodelan *transformator* daya pada *software ATP-EMTP*.
2. Mensimulasikan metode *sequential phase energization* pada *software ATP-EMTP* dan menganalisa pengaruh metode tersebut terhadap nilai arus *inrush*.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Mengetahui seberapa besar arus *inrush* yang berhasil dikurangi menggunakan metode *SPE* dan tanpa menggunakan metode *SPE*.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Studi Literatur**

Penelitian ini menjelaskan tentang metode yang akan digunakan untuk mengurangi arus *inrush* yang terjadi pada *transformator*. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui metode terbaik kemudian membandingkan dengan hasil simulasi *EMTP/ATP*[1]. Perbedaan penelitian yang akan saya lakukan dengan penelitian yang sudah ada yaitu pada penelitian yang saya lakukan berfokus pada pengurangan arus *inrush* pada *transformator* sedangkan pada penelitian dari Abidin yaitu menentukan metode terbaik yang akan digunakan untuk mengurangi arus *inrush*.

Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui seberapa besar dampak yang timbul akibat pengaruh arus *inrush* pada *transformator*. Arus *inrush* terjadi karena *transformator* dihubungkan pada arus listrik. Untuk meminimalisasi arus *inrush* pada *transformator* dapat dilakukan dengan memasang *resistor*, *switch*, *inrush thermistor*, *soft starter*, dan kapasitor. Pembahasan pada penelitian ini lebih cenderung ke arah arus *inrush* yang terjadi akibat magnetisasi pada *transformator* akibat dialiri arus listrik[2]. Perbedaan dengan penelitian yang saya lakukan yaitu saya berfokus pada pengurangan arus *inrush* dengan menggunakan metode *SPE*.

Tujuan utama dari penelitian ini yaitu merancang dan membuat sebuah alat yang dapat digunakan untuk mengurangi jumlah fluks yang dihasilkan waktu *transformator* dienergize arus listrik (DC) yang berguna untuk mengurangi fluks sisa sehingga lonjakan arus dapat dikurangi. Metode yang digunakan yaitu metode *variable frequency – constant voltage*[3]. Perbedaan dengan penelitian yang saya lakukan yaitu saya hanya mensimulasikan pengurangan arus *inrush* dengan software *ATP-EMTP* yang menggunakan sumber arus bolak balik tanpa membuat alat atau rangkaian.

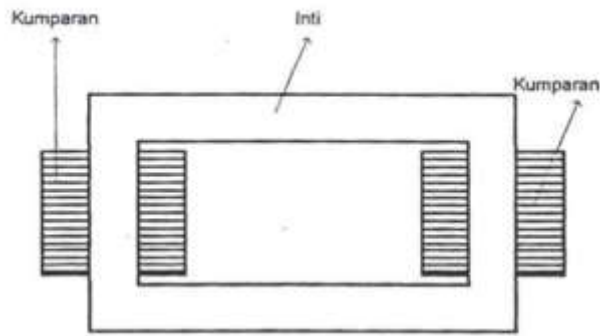
#### **2.2 Tinjauan Teori**

##### **2.2.1 Transformator**

*Transformator* merupakan komponen elektronika yang digunakan untuk menurunkan atau menaikkan tegangan listrik. *Transformator* bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Dimana ketika *transformator* dienergize arus listrik sehingga menimbulkan fluks magnet, fluks magnet yang berubah-ubah akan menimbulkan *ggl* induksi/ beda potensial.

Berdasarkan model inti, *transformator* dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

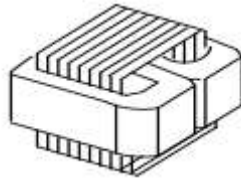
1. *Transformator core type*



**Gambar 2.1** Pemodelan *transformator* inti *core type*[7].

Pada model inti *core* berbentuk persegi dan lilitan kumparan *transformator* berada pada posisi kanan dan kiri. Dan umumnya model inti seperti ini digunakan untuk tegangan tinggi.

2. *Transformator shell type*



**Gambar 2.2** Pemodelan *transformator* inti *shell type*[7]

Pada model inti *shell* juga berbentuk persegi akan tetapi lilitan kumparan berada pada tengah – tengah inti dan juga dikelilingi inti. Umumnya model inti ini digunakan pada tegangan rendah.

Didalam *transformator* juga terdapat rugi – rugi yang diantaranya rugi- rugi tembaga ( $P_{cu}$ ) dan rugi- rugi besi ( $P_i$ ). Didalam rugi-rugi inti besi terbagi menjadi 2 diantaranya rugi-rugi histerisis yang disebabkan oleh fluks dan rugi-rugi eddy yang dikarenakan arus diinti besi. Apabila *transformator* dalam kondisi berbeban atau tidak berbeban terdapat rugi- rugi inti saja dan ketika beban berubah hal itu tidak akan mempengaruhi rugi inti.

Berikut rugi-rugi pada *transformator* :

1. Rugi – rugi tembaga ( $P_{cu}$ )

Rugi- rugi ini dikarenakan arus yang mengalir pada kawat kumparan. Rugi- rugi tembaga dapat ditulis dalam persamaan dibawah ini:

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \quad (2.1)$$

Dimana:

- $P_{cu}$  = rugi-rugi tembaga (watt)
- $I$  = arus (A)
- $R$  = tahanan ( $\Omega$ )

## 2. Rugi – rugi inti (Pi)

Rugi – rugi inti/ rugi- rugi besi pada transformator adalah rugi dalam watt. Rugi- rugi inti (Pi) dibagi menjadi dua, diantaranya rugi histerisis dan rugi eddy. Rugi histerisis adalah rugi -rugi yang dikarenakan fluks bolak-balik dalam inti[7], sedangkan rugi – rugi eddy dikarenakan oleh arus pusar pada inti. Sehingga rugi inti dapat ditulis persamaan berikut:

$$P_i = P_h + P_e \quad (2.2)$$

Dimana:

- P<sub>i</sub> = rugi - rugi inti (watt)
- P<sub>h</sub> = rugi - rugi histerisis (watt)
- P<sub>e</sub> = rugi - rugi eddy (watt)

### 2.2.2 Arus *Inrush*

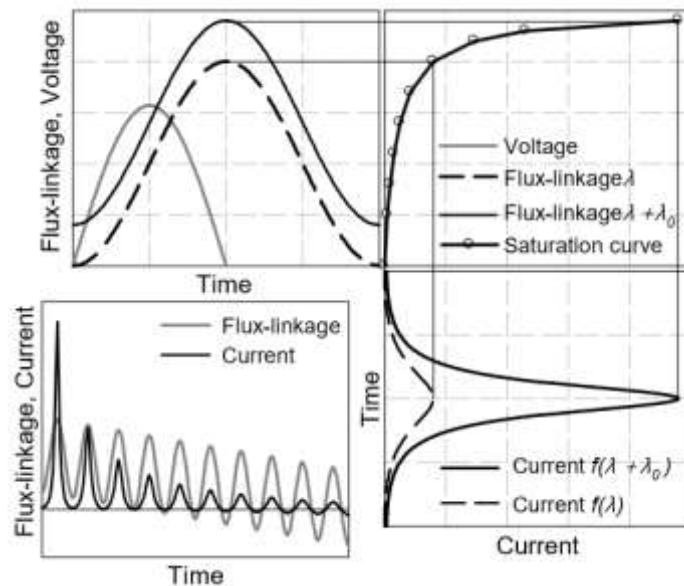
Ketika *transformator dienergized* pada sumber arus bolak balik, maka menghasilkan arus transien dalam beberapa detik sebelum mencapai keadaan stabil. Keadaan ini dapat dikatakan dengan arus *inrush*. Arus *inrush* akan mengalir pada rentang waktu yang pendek hingga keadaan stabil.. Besarnya arus *inrush* bisa mencapai 8-12 kali dari arus nominal *transformator* [3]. Memang banyak faktor terjadinya arus *inrush* namun faktor utama adalah fluks sisa (*residual fluks*) dan fluks transien yang dihasilkan oleh integral waktu dari tegangan suplai sinusoidal[4]. Arus magnetisasi yaitu arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada inti *transformator*. Arus magnetisasi merupakan arus bolak balik yang membentuk fluks pada inti *transformator* yang dimana fluks didalamnya juga akan berubah- ubah sesuai dengan frekuensi arus tersebut. Fenomena terjadinya arus *inrush* harus diperhatikan agar tidak terjadi kesalahan saat melilih sistem proteksi yang tepat. Sehingga harus ada upaya pengurangan arus *inrush* supaya tidak mengganggu kerja *relay*.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi nilai besar dan kecilnya arus *inrush* yaitu:

- Sudut *switching* tegangan
- Fluks sisa pada inti *transformator*
- Karakteristik inti transformator[4]

Proses terjadinya arus *inrush* dapat dilihat pada Gambar 2.3





**Gambar 2.3** Proses terjadinya arus *inrush* [6]

Berdasarkan Gambar 2.3 diatas dapat dijelaskan bahwa arus *inrush* terjadi pada saat *transformator* diberi tegangan, *transformator* akan bekerja sebagai hambatan sehingga akan menyebabkan fluks tertinggal 90° dari tegangan. Nilai maksimal gelombang fluks terjadi apabila gelombang fluks telah mencapai ¼ lonjakan dari gelombang tegangan. Selama *transformator* beroperasi, nilai fluks akan naik dua kali lipat dari nilai maksimum fluks saat kondisi normal. Ketika fluks dalam kondisi maksimal akan menyebabkan inti *transformator* dalam kondisi saturasi sehingga akan menghasilkan arus *inrush* yang sangat besar.

Untuk menghitung arus *inrush* dapat menggunakan Persamaan 2.3

$$I_{inrush} = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\sqrt{(\omega \cdot L)^2 + R^2}} \left( \frac{2 \cdot B_N + B_R + B_S}{B_N} \right) \quad (2.3)$$

Dimana:

V = tegangan.

L = induktansi gulungan *transformator*.

R = resistansi.

$B_R$  = kerapatan fluks sisa dari inti *transformator*.

$B_S$  = kerapatan fluks saturasi (jenuh) dari inti.

$B_N$  = nilai arus nominal[5].

### 2.2.3 Hukum Faraday

Hukum faraday merupakan hukum yang mempelajari tentang proses terjadinya medan magnet yang disebabkan oleh arus listrik. Hukum faraday biasa disebut dengan hukum induksi elektromagnetik. Induksi elektromagnetik merupakan suatu peristiwa yang menyebabkan terjadinya gaya gerak listrik didalam lilitan apabila terjadi perubahan fluks didalam sebuah inti

*transformator*. Sedangkan fluks dapat diartikan sebagai jumlah garis gaya yang melintasi sebuah bidang yang tegak lurus terhadap garis gaya *magnetic*. Setiap perubahan pada fluks yang terhubung pada lilitan akan menyebabkan terjadinya gaya gerak elektromagnetik yang diinduksi didalam lilitan. Perubahan pada fluks ini akan menyebabkan terjadinya gaya gerak listrik yang diinduksi secara statis.

Untuk mengetahui gaya gerak listrik dapat diketahui dengan menggunakan hukum faraday pada Persamaan 2.4[5] :

$$e = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

Dimana:

$e$  = gaya gerak listrik

$N$  =jumlah lilitan

$d\phi$  = Perubahan fluks

$dt$  = Selang waktu[5].

Apabila tegangan yang diberikan merupakan gelombang sinus,  $e = \int E \sin(\omega t + \varphi)$ , maka :

$$-N_1 \int \frac{d\phi}{dt} = \int e$$

$$-N_1 \phi = \int E \sin(\omega t + \varphi)$$

$$-N_1 \phi = \frac{-E}{\omega} \cos(\omega t + \varphi)$$

$$-\phi = \frac{-E}{N_1 \omega} \cos(\omega t + \varphi)$$

Dari persamaan diatas disubstitusikan sehingga didapatkan harga fluks normal :

$$\phi = \phi_m \cos(\omega t + \varphi)$$

Pada saat  $t=0$  (energize), fluks yang timbul :

$$\phi = \phi_m \cos \varphi + \phi_{t0}$$

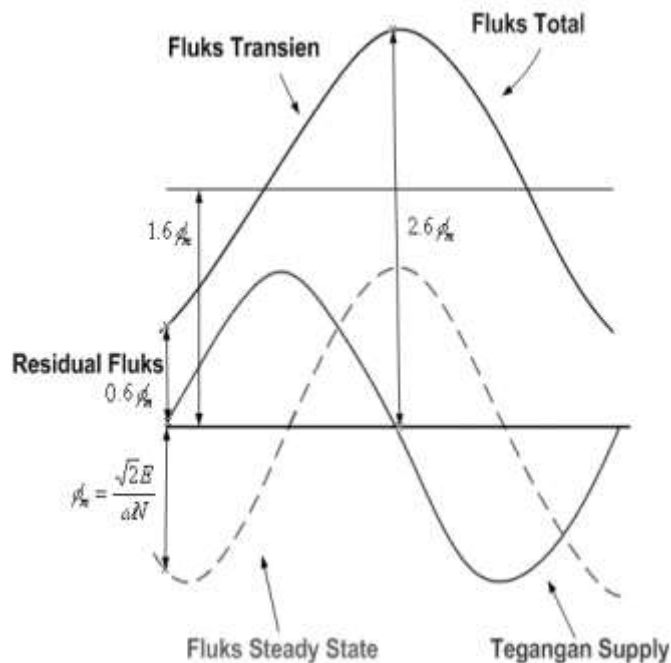
sudut  $\varphi$  tergantung pada tegangan ketika *transformator* deenergize. Namun apabila *transformator* dihubungkan saat gelombang tegangan sama dengan nol tanpa fluks sisa maka :

$$\phi = \phi_m \cos \omega t + \phi_{t0}$$

sedangkan apabila *close switch* terjadi saat gelombang tegangan sama dengan nol dan ada fluks sisa maka :

$$\phi = \phi_m \cos \omega t + \phi_m + \phi_R$$

sehingga apabila diplot menghasilkan gambar seperti dibawah ini :



**Gambar 2.4** Fluks pada *transformator*[7].

## 2.2.4 Pemodelan *Transformator* dan Induktor di ATP-EMTP

### 1. *Transfomator*

Model *transformator* yang digunakan untuk simulasi adalah BCTRAN 3 fasa dengan 2 belitan . Data yang dimasukkan dalam *transformator* : Frekuensi, daya, tegangan sisi primer dan sekunder, data test hubung singkat diantaranya rugi-rugi, arus, tegangan.

### 2. Induktor nonlinier

Model inductor nonlinier ini digunakan untuk melengkapi simulasi *transformator* dikarenakan sifat non linier belum dimasukkan dalam model *transformator*. Data yang dimasukkan dalam inductor non linier adalah perubahan fluks terhadap arus.

### 3. *Switch* 3 fasa

Model *switch* 3 fasa ini digunakan untuk mengatur waktu buka tutup *switch* tiap fasanya. Data yang dimasukkan waktu buka dan waktu tutup setiap fasa dalam detik.

#### 4. Probe tegangan

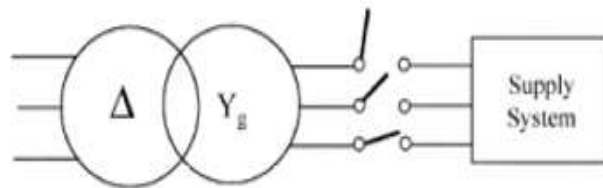
Model ini digunakan untuk mengukur besaran tegangan yang melaluinya.

#### 5. AC 3 fasa type 14

Model ini digunakan untuk sumber tegangan ac. Data yang dimasukkan besar tegangan, frekuensi dan waktu saat energize.

### 2.2.5 Metode *Sequential Phase Energization (SPE)*

Usaha dalam mengurangi lonjakan arus *inrush* yang besar salah satunya dengan menggunakan metode *Sequential Phase Energization*. Karena faktanya menunjukkan bahwa pada setiap fasanya, nilai arus *inrush* tidak selalu sama sehingga diterapkan energisasi berselang setiap fasanya. Metode ini sangat sederhana dan bisa mengurangi arus *inrush* yang terjadi saat *energize* sebesar 80-90%. Secara garis besarnya metode ini bekerja dengan cara memberikan *delay* pada setiap fasa (A, B, C). Hal ini berdasarkan faktanya arus *inrush* pada setiap fasa *transformator* tidak seimbang. Berikut adalah skema metode *Sequential Phase Energization (SPE)* :



**Gambar 2.5** Skema Metode *Sequential Phase Energization (SPE)*

Karena arus ini sangat besar sehingga dapat menyebabkan hubung singkat. Banyak penelitian yang sudah dilakukan guna mengurangi lonjakan arus ini. Dalam metode *SPE* ini terdapat parameter penting agar pengurangan arus *inrush* bisa berjalan yaitu *delay* waktu tiap fasanya. Dengan kata lain *switch* fasa 3 dalam keadaan *close* apabila fasa 1 dan fasa 2 telah mencapai keadaan *steady state*. Begitu juga dengan *switch* fasa 2 akan dalam kondisi *close* apabila fasa 1 sudah mencapai kondisi *steady state*. Pemilihan waktu penutupan *switch* setiap fasanya berdasarkan arus terkecil yang diambil saat simulasi dengan sudut yang telah ditentukan. Pada metode ini fasa 1 lah yang digunakan untuk acuan pegerasan sudut untuk tiap fasanya. Karena pengaturan waktu penutupan *switch* setiap fasanya sangat berpengaruh dalam pengurangan arus *inrush* .

## BAB 3

### METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software ATP-EMTP*. Hasil dari penelitian ini berupa kurva lonjakan arus *inrush*.

#### 3.1 Data spesifikasi *transformator*

Data spesifikasi *transformator* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1. Pemilihan rating *transformator* yang digunakan merupakan *transformator* untuk jaringan tegangan menengah (JTM). Hal ini dikarenakan kapasitas transformator, tegangan primer maupun sekunder, vector grup dan juga sudah memenuhi standart *IEC*. *Transformator* ini juga sudah memiliki *on load tap changer* yang berguna untuk mempertahankan agar tegangan pada sisi sekunder tetap konstan.

**Tabel 3.1** Spesifikasi transformator 3 phasa

Merek	Powel
Daya	60 MVA
Frekuensi	50 Hz
Tegangan Maksimum	170 KV
Tegangan	150/20 kV
Arus nominal	230,9/1732 A
Vector group	<i>Ynyno (d1)</i>
<i>Tap Changer</i>	<i>On Load</i>
Standar	IEC
Jumlah fasa	3
<i>Made in</i>	Indonesia

##### 3.1.1 Data hasil pengujian *transformator* dari PT. Powel

Data pengujian *transformator* yang berasal dari PT. Powel dapat dilihat pada Tabel 3.2. Rugi- rugi tanpa beban (NLL). Berdasarkan dari tabel 3.2 pada pengujian pertama dengan tegangan 102 kV dengan arus 1,18 A daya losses yang dihasilkan 11,202 kW dan seterusnya. Daya losses adalah selisih antara tegangan masuk dan tegangan keluar. Dari pengujian ini dapat disimpulkan bahwa semakin besar tegangan maka semakin besar daya lossesnya.

**Tabel 3.2** Data hasil pengujian *transformator*

Tegangan (kV)	Arus ( A)	Daya <i>losses</i> (kW)
102	1,18	11,202
119	1,20	12,486
136	1,28	16,400
153	1,52	21,944
170	2,48	29,867
178,5	4,12	35,588
187	8,96	43,731

### 3.1.2 Data tes hubung buka *transformator* 60 MVA

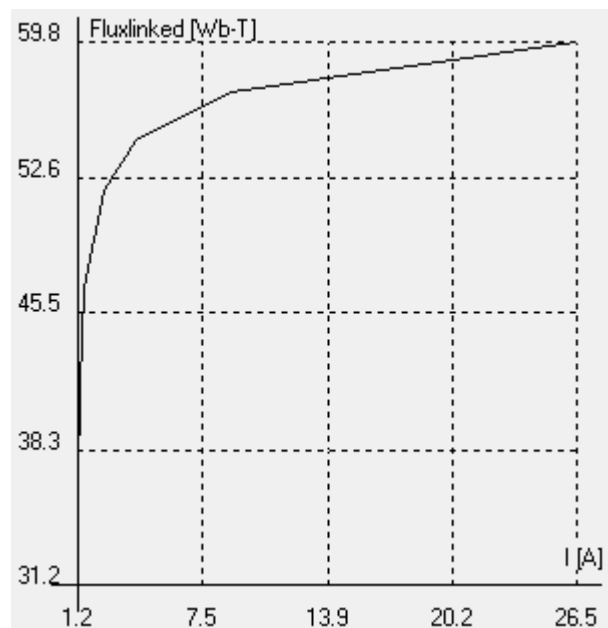
Tabel 3.3 merupakan data hasil tes hubung buka *transformator* 60 MVA:

**Tabel 3.3** Data tes hubung buka

Tegangan (kV)	Arus Hubung Buka (A)	Rugi- rugi Hubung Buka (kW)
170	2,48	29,867

### 3.1.3 Data perubahan fluks terhadap arus

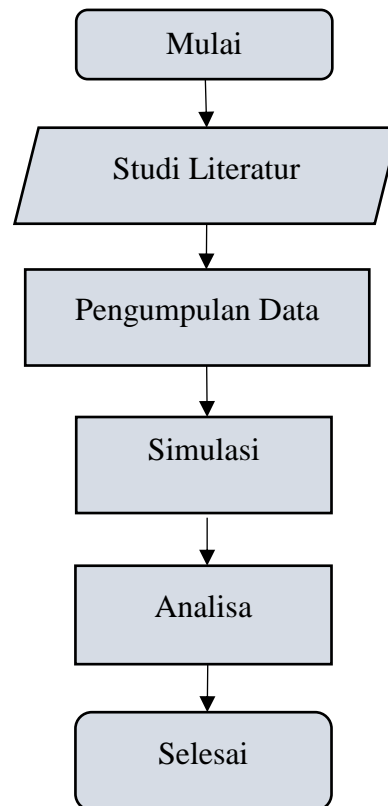
Perubahan fluks terhadap arus dapat dilihat pada Gambar 3.1



**Gambar 3.1** Perubahan fluks terhadap arus

### 3.2 Alur Penelitian

Penyelesaian tugas akhir ini dilakukan secara bertahap sesuai dengan diagram alur pada Gambar 3.2



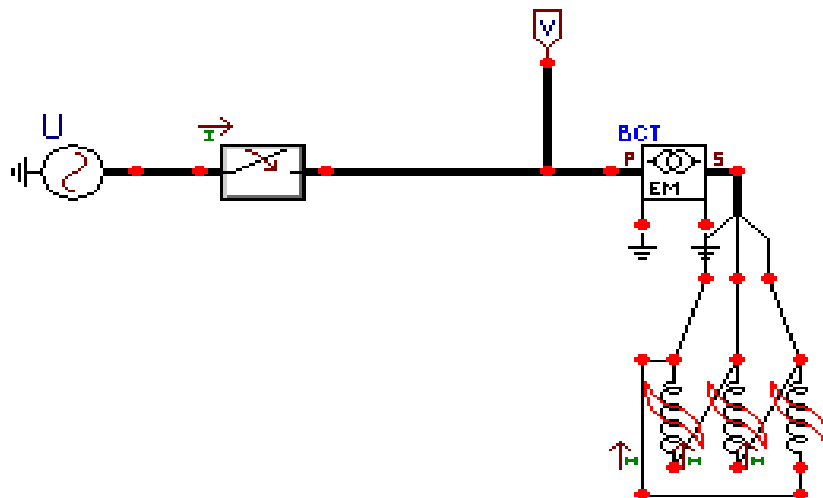
**Gambar 3.2** Diagram Alur Penelitian

Tahap pertama yaitu mencari studi literatur yang berhubungan dengan penyelesaian tugas akhir ini. Studi literatur yang dilakukan adalah dengan membaca penelitian-penelitian yang sudah ada dari buku dan jurnal yang dapat digunakan sebagai referensi dalam pelaksanaan penelitian. Tahap kedua yaitu mengumpulkan data. Data yang dikumpulkan yaitu data *transformator* 3 fasa yang terdiri dari data spesifikasi *transformator* dan perubahan fluks terhadap arus. Data inilah yang akan diinput pada komponen simulasi pada *ATP-EMTP*. Setelah data dikumpulkan, selanjutnya masuk ke tahap ketiga yaitu melakukan simulasi pada *software ATP-EMTP*. Simulasi yang dilakukan yaitu simulasi yang berupa pembuatan single diagram. Dalam pembuatan simulasi terbagi menjadi 2 jenis yaitu simulasi sistem tanpa metode *SPE* dan simulasi sistem dengan menggunakan metode *SPE*. Pada simulasi tanpa menggunakan metode *SPE* waktu *close* setiap fasanya akan sama. Hal ini guna melihat lonjakan arus *inrush* yang terjadi. Hasil simulasi tanpa metode *SPE* akan tampil dalam bentuk grafik. Simulasi menggunakan metode *SPE* waktu *close* setiap fasa pada *switch* berbeda dengan tanpa menggunakan metode *SPE*. Hal ini dikarenakan metode *SPE* saat *switch close* ada selang waktu setiap fasanya. Dalam pemilihan waktu *close*

metode SPE dengan cara mencari arus terkecil pada fasa 1 mulai dari sudut 0- 360° Sudut inilah yang akan menjadi acuan pergeseran setiap fasanya. Sudut ini akan dikonversikan ke detik. Sehingga akan terjadi selang waktu setiap fasanya. Setelah tahap simulasi diselesaikan, kemudian masuk ketahap ke empat yaitu Analisa hasil. Analisa dilakukan dengan dua tahap, pertama ialah dengan mengamati hasil simulasi yang diperlihatkan pada *software ATP-EMTP* tanpa metode *SPE*, selanjutnya ialah dengan mengamati hasil simulasi yang menggunakan metode *SPE*. Kedua hasil simulasi tersebut akan ditampilkan dalam bentuk grafik. Guna memudahkan dalam pembacaan, hasil akan ditampilkan dalam bentuk tabel. Setelah didapatkan hasil dari dua simulasi yang dilakukan maka dapat dilanjutkan dengan membandingkan hasil menggunakan metode *non SPE* dan menggunakan metode *SPE* dan selanjutnya membuat kesimpulan terhadap penelitian yang telah dilaksanakan.

### 3.3 Simulasi Sistem

Gambar 3.3 adalah pemodelan *single line diagram* menggunakan *software ATP-EMTP* dengan *suplay* tegangan 170 kV dengan daya 60 MVA. Pada *starting* simulasi ini tanpa menggunakan beban dan *transformator* pada kondisi saturasi (jenuh).



**Gambar 3.3** Pemodelan Simulasi

### 3.4 Pemilihan Waktu *Close Switch*

Pemilihan waktu *close switch* 3 fasa berdasarkan arus terkecil yang didapatkan dari hasil simulasi yang dimulai dari sudut 0° sampai 360°. Sudut tersebut akan digunakan untuk *delay* setiap fasanya pada *switch* 3 fasa. Pemilihan waktu *close switch* dapat dilihat pada Tabel 3.4



**Tabel 3.4** Pemilihan waktu *close switch*

Sudut (°)	Waktu (detik)	Arus (A)
0	0	-3000
45	0,0025	-2565,3
90	0,005	1235,4
120	0,00666	2126,3
150	0,0083	2844,7
180	0,01	2981,1
210	0,0116	2867,2
240	0,0133	2163,2
270	0,015	-1290
300	0,0166	-2103,8
330	0,018	-2755,3
360	0,02	-3000

Berdasarkan Tabel 3.4 dapat dijelaskan bahwa arus yang dihasilkan dari simulasi dengan waktu *close* setiap fasanya sama atau tidak ada selang waktu antar fasa. Dimana arus tersebut diperoleh dari simulasi mulai dari sudut  $0^\circ - 360^\circ$  tanpa selang waktu setiap fasanya. Dari hasil tabel tersebut arus terkecil yang dihasilkan dari simulasi terdapat pada sudut  $90^\circ$  yang bernilai -1235,4 A. Sehingga dipilihlah waktu *close* yang tepat pada sudut  $90^\circ$  atau pada detik ke 0,005. Sudut tersebut akan menjadi acuan bergesernya antar fasa berikutnya sebesar  $90^\circ$ .

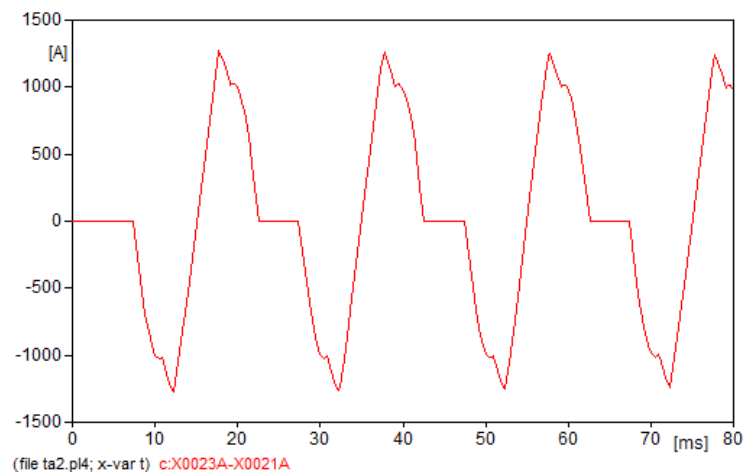
## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

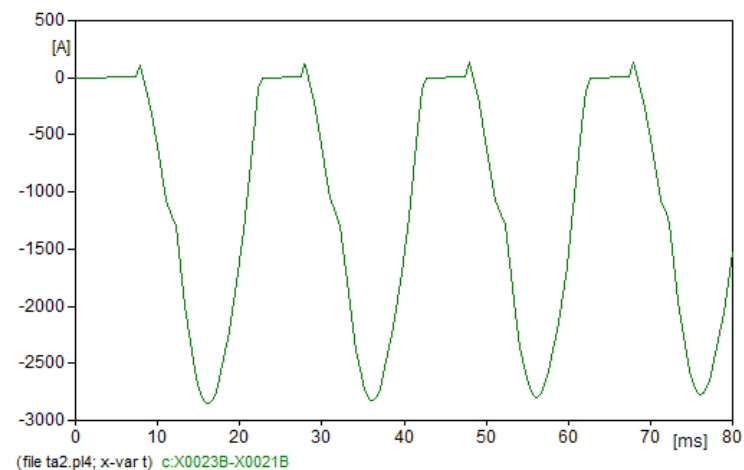
Dalam pembahasan pada penelitian ini dibagi menjadi 2 jenis pembahasan yaitu pembahasan simulasi tanpa metode *SPE* dan Pembahasan simulasi menggunakan metode *SPE*.

#### 4.1 Hasil Simulasi Tanpa Metode *SPE*

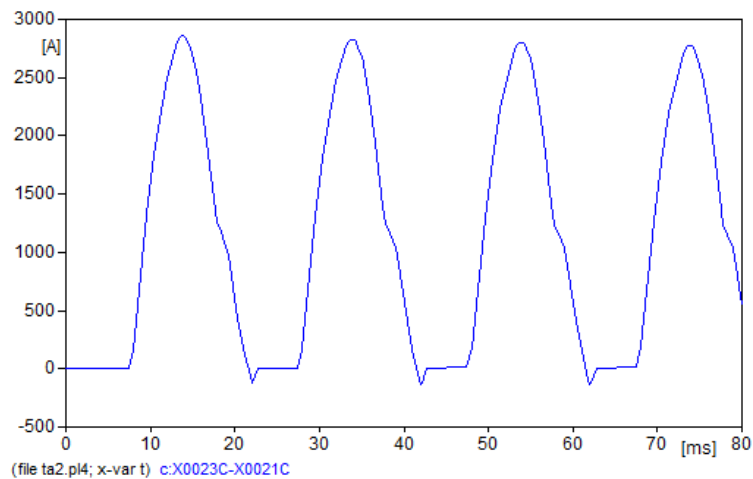
Dalam proses simulasi tanpa metode *SPE* waktu *close switch* yang digunakan adalah 0,005 semua waktu *close switch* sama/ tidak ada delay setiap fasanya. Hasil dari simulasi akan dibagi menjadi 4 grafik yang dimana fasa 1 ditandai dengan warna merah, fasa 2 warna hijau dan fasa 3 dengan warna biru. Pembagian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar lonjakan arus *inrush* dari setiap fasa. Adapun hasil dari simulasi tanpa metode *SPE* dapat dilihat pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.4



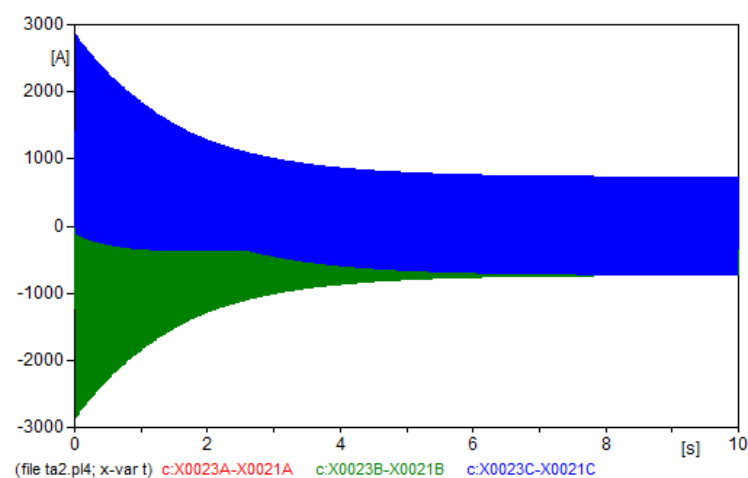
**Gambar 4.1** Grafik arus *inrush* fasa 1



**Gambar 4.2.** Grafik arus *inrush* fasa 2



**Gambar 4.3** Grafik arus *inrush* fasa 3



**Gambar 4.4** Grafik arus *inrush* ketiga fasa

Pada Gambar 4.1 arus *inrush* fasa 1 diperlihatkan pada waktu 0,005 detik. Hal ini dikarenakan *switch* pada fasa 1 menutup pada waktu 0,005 detik sehingga arus *inrush* diperlihatkan pada detik tersebut. Pada Gambar 4.1 terbaca nilai arus *inrush* maksimumnya sebesar 1235,4 A. Sehingga, arus *inrush* pada fasa 1 mengalami lonjakan sebesar 5,35 kali dari arus nominal.

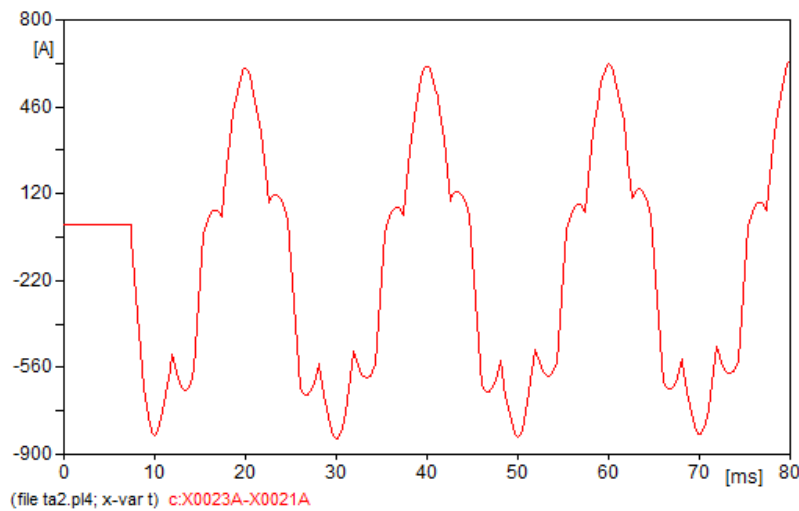
Pada Gambar 4.2 arus *inrush* fasa 2 diperlihatkan pada waktu 0,005 detik. Hal ini dikarenakan *switch* pada fasa 2 menutup pada waktu 0,005 detik sehingga arus *inrush* diperlihatkan pada detik tersebut. Pada Gambar 4.2 terbaca nilai arus *inrush* maksimumnya sebesar -2850 A. Sehingga, arus *inrush* pada fasa 1 mengalami lonjakan sebesar 12,34 kali dari arus nominal.

Pada Gambar 4.3 arus *inrush* fasa 3 diperlihatkan pada waktu 0,005 detik. Hal ini dikarenakan *switch* pada fasa 3 menutup pada waktu 0,005 detik sehingga arus *inrush* diperlihatkan pada detik tersebut. Pada Gambar 4.3 terbaca nilai arus *inrush* maksimumnya sebesar 2855,8 A. Sehingga, arus *inrush* pada fasa 1 mengalami lonjakan sebesar 12,36 kali dari arus nominal.

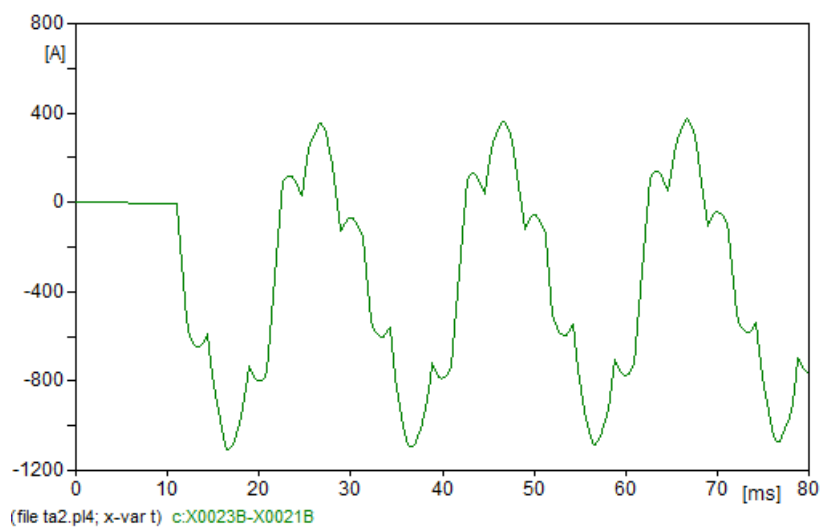
Gambar 4.4 menunjukkan arus *inrush* ketiga fasa. Dimana fasa 1 diketahui dengan menggunakan warna merah, fasa 2 menggunakan warna hijau, dan fasa 3 menggunakan warna biru. Tampak arus *inrush* mulai pada kondisi *steady state* pada 7,8 detik.

#### 4.2 Hasil Simulasi Dengan Metode SPE

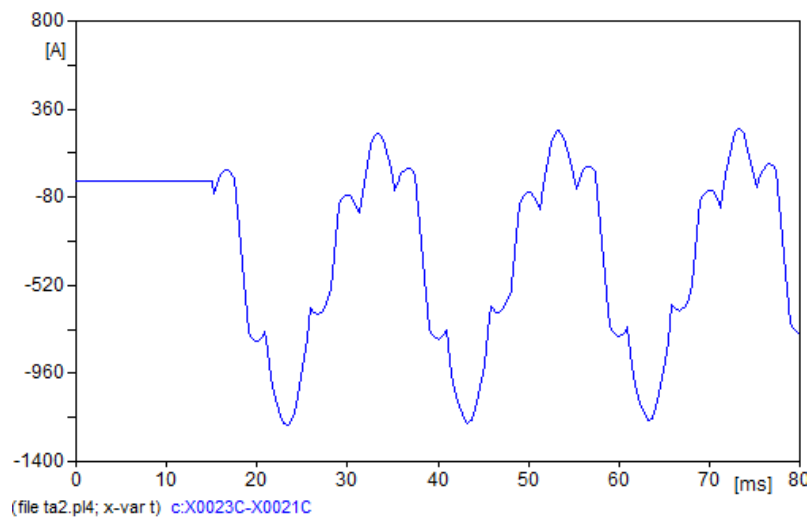
Dalam proses simulasi menggunakan metode *SPE* waktu *close switch* yang digunakan pada fasa 1 0,005, fasa 2 0,01 dan fasa 3 0,015. Hasil dari simulasi akan dibagi menjadi 4 grafik yang dimana fasa 1 ditandai dengan warna merah, fasa 2 warna hijau dan fasa 3 dengan warna biru. Pembagian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar lonjakan arus *inrush* dari setiap fasa. Adapun hasil dari simulasi menggunakan metode *SPE* dapat dilihat pada Gambar 4.5 sampai Gambar 4.8



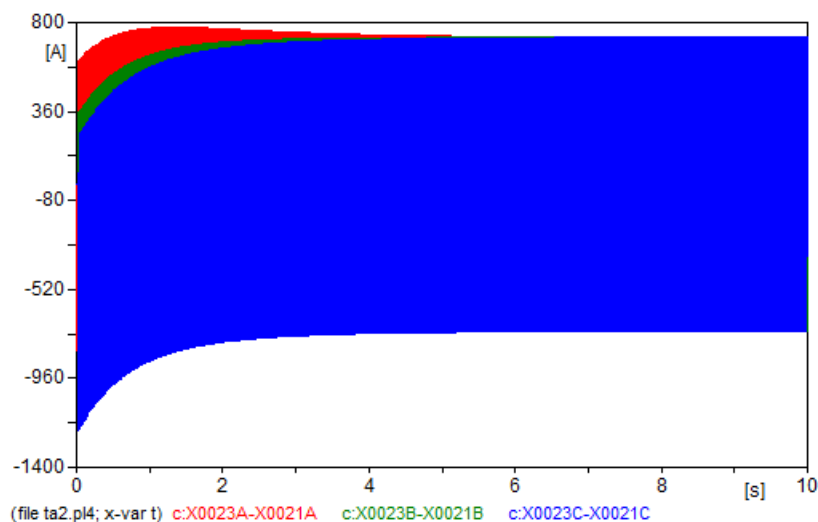
**Gambar 4.5** Arus *Inrush* pada fasa 1 menggunakan metode *SPE*



**Gambar 4.6** Arus *Inrush* pada fasa 2 menggunakan metode *SPE*



**Gambar 4.7** Arus *Inrush* pada fasa 3 menggunakan metode *SPE*



**Gambar 4.8** Arus *Inrush* pada ke tiga fasa menggunakan metode *SPE*

Pada Gambar 4.5 arus *inrush* fasa 1 diperlihatkan pada waktu 0,005 detik. Hal ini dikarenakan *switch* pada fasa 1 menutup pada waktu 0,005 detik sehingga arus *inrush* diperlihatkan pada detik tersebut. Pada Gambar 4.5 terbaca nilai arus *inrush* maksimumnya sebesar -824,55 A. Sehingga, arus *inrush* pada fasa 1 mengalami lonjakan sebesar 3,57 kali dari arus nominal.

Pada Gambar 4.6 arus *inrush* fasa 2 diperlihatkan pada waktu 0,01 detik. Hal ini dikarenakan *switch* pada fasa 2 menutup pada waktu 0,01 detik sehingga arus *inrush* diperlihatkan pada detik tersebut. Pada Gambar 4.6 terbaca nilai arus *inrush* maksimumnya sebesar -1094,6 A. Sehingga, arus *inrush* pada fasa 1 mengalami lonjakan sebesar 4,74 kali dari arus nominal.

Pada Gambar 4.7 arus *inrush* fasa 3 diperlihatkan pada waktu 0,015 detik. Hal ini dikarenakan *switch* pada fasa 3 menutup pada waktu 0,015 detik sehingga arus *inrush* diperlihatkan pada detik tersebut. Pada Gambar 4.7 terbaca nilai arus *inrush* maksimumnya sebesar

-1221 A. Sehingga, arus *inrush* pada fasa 1 mengalami lonjakan sebesar 5,28 kali dari arus nominal.

Gambar 4.8 menunjukkan arus *inrush* ketiga fasa. Dimana fasa 1 diketahui menggunakan warna merah, fasa 2 menggunakan warna hijau dan fasa 3 menggunakan warna biru. Tampak arus *inrush* mulai pada kondisi *steady state* pada 5,2 detik.

#### 4.3 Perbandingan Arus *Inrush* Tanpa Metode SPE dan Menggunakan Metode SPE

**Tabel 4.1.** Perbandingan arus *inrush* menggunakan metode *SPE* dan tanpa metode *SPE*

Fasa	Arus Nominal		Persentase Pengurangan Arus <i>Inrush</i>
	Tanpa Metode <i>SPE</i> ( $I_{nom}$ )	Menggunakan Metode <i>SPE</i> ( $I_{nom}$ )	
1	5,35	3,57	33,25 %
2	12,34	4,74	61,59 %
3	12,36	5,28	57,24 %

Pada Tabel 4.1 tanpa menggunakan metode *SPE* pada fasa 1 menunjukkan lonjakan arus *inrush* sebesar 1235,4 A atau mengalami lonjakan 5,35 kali dari arus nominal. Fasa 2 menunjukkan lonjakan arus *inrush* sebesar -2850,5 A atau lonjakan 12,34 kali dari arus nominal. Fasa 3 menunjukkan lonjakan arus *inrush* sebesar 2855,8 A atau mengalami lonjakan 12,36 kali dari arus nominal. Hasil simulasi tanpa menggunakan metode *SPE* tampak arus *inrush* mulai *steady state* pada 7,8 detik. Sedangkan saat menggunakan metode *SPE* fasa 1 menunjukkan lonjakan arus *inrush* sebesar -824,55 A atau mengalami lonjakan 3,57 kali dari arus nominal. Fasa 2 menunjukkan lonjakan arus *inrush* sebesar -1094,6 A atau mengalami lonjakan 4,74 kali dari arus nominal. Fasa 3 menunjukkan lonjakan arus *inrush* sebesar -1221 A atau mengalami lonjakan 5,28 kali dari arus nominal. Hasil simulasi menggunakan metode *SPE* menunjukkan arus *inrush* yang timbul pada ketiga fasa mencapai nilai *steady state* 5,2 detik. Sehingga metode *SPE* pada fasa 1 terjadi pengurangan sebesar 33,25 %, fasa 2 terjadi pengurangan 61,59 % dan fasa 3 terjadi pengurangan sebesar 57,24 %.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

1. Fluks sisa sangat berpengaruh dalam lonjakan arus *inrush*, akan tetapi fluks sisa dapat dikurangi dengan mengontrol waktu *switching* yang tepat pada *transformator*.
2. Metode *SPE* tergolong efektif dalam pengurangan arus *inrush*.
3. Pada kondisi tidak menggunakan metode *SPE* arus *inrush* yang terbaca pada fasa 1 sebesar 1235,4 A, fasa 2 sebesar -2850,5 A, dan fasa 3 sebesar 2855,8 A. Pada saat menggunakan metode *SPE* arus *inrush* yang terbaca pada fasa 1 sebesar -824,55 A, fasa 2 sebesar -1094,6, fasa 3 sebesar -1221 A.
4. Metode ini berhasil mereduksi lonjakan arus *inrush* pada fasa 1 sebesar 33,25 %, fasa 2 sebesar 61,59 % dan fasa 3 sebesar 57,24 %. Arus *inrush* yang timbul pada *transformator* daya tereduksi secara signifikan dibandingkan tanpa menerapkan metode, Sehingga metode ini layak diterapkan dalam pengurangan arus *inrush*.

#### **5.2 Saran**

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu membandingkan metode *SPE* dengan metode lainnya yang bertujuan agar dapat mengetahui metode yang lebih efisien dalam mengetahui pengurangan arus *inrush* sehingga dapat diaplikasikan dalam sistem nyata.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Abidin, "Metode Analisa Reduksi Pada Transformator," *Jurnal Teknik Universitas Islam Lamongan*, vol. 2, no. 1, pp 1-6, 2010.
- [2] S. Titiek, "Minimalisasi Arus Inrush Pada Transformator Daya 20 kV," *Seminar Nasional Teknoin: Pengembangan Teknologi Industri Bebas Green Technology*, Yogyakarta 11 Desember, 2010.
- [3] D. W. Darmawan, I. M. Yulistya dan D. C. Riawan "Demagnetisasi Arus Inrush Pada Transformator Fasa 1 kVA Menggunakan Metode Pengurangan Sisa Medan Magnet Dengan Menggunakan Sumber Tenaga Berfrekuensi Sangat Rendah," *Jurnal Teknik Institute Teknologi Sepuluh November*, vol. 5, no. 2, pp B96-B102, 2 2016.
- [4] R. A. Turner, K. S. Smith "Resonance Excited By Transformator Inrush Current in Inter-connected offshore Power Systems," *IEEE Transmission and Distribution*, vol vol 1, pp 978-985, 2008.
- [5] K. J. Patel, "Effects of Transformer Inrush Current," *Dissertation Faculty of Health University of Southern Queensland*, 2013.
- [6] N. Chiesa, "Power Transformer Modelling For Inrush Current Calculation" *Doctoral Theses Faculty of Information Technology Norwegian University of Science and Technology*, 2010.
- [7] E. Sitorus, "Studi Pengaruh Arus Inrush dan Arus Hubung Singkat Terhadap Pengaman Transformator," *Skripsi Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara*, 2010.